

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MÊCANICA DE *PELLETS* DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

ANA CAROLINA LOPES AMARAL COSTA¹, HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR², EMANUEL RANGEL SPADIM³, JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA⁴, SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA⁵

¹ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Avenida Universitária - 3780, CEP: 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: cacostal@hotmail.com

² Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Avenida Universitária - 3780, CEP: 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: hdjejunior@gmail.com

³ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Avenida Universitária - 3780, CEP: 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: spadim@gmail.com

⁴ Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Rod. João Leme dos Santos, km 110, CEP: 13052-780. Bairro Itinga, Sorocaba, São Paulo, Brasil. E-mail: josemauro@ufscar.br

⁵ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Avenida Universitária - 3780, CEP: 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: saulo.guerra@unesp.br

RESUMO: A bioenergia é uma das alternativas para diminuir a dependência de combustíveis fósseis da matriz energética mundial. Os *pellets* surgem como uma opção interessante para a produção de biomassa e o bagaço de cana-de-açúcar, também, pode ser aproveitado na forma de *pellets*. *Pellets* é o nome dado ao produto resultante do processo de compressão aplicada a uma matéria prima, sendo que em muitos casos essa matéria prima é preparada previamente através do processo de secagem e moagem. O objetivo da pesquisa foi realizar a análise das propriedades: físicas - densidade, umidade, granulometria, diâmetro e comprimento, químicas – teor de carbono fixo, material volátil e cinzas, mecânicas - durabilidade mecânica e o poder calorífico superior. Foram analisadas amostras de *pellets* provenientes de fazendas do Estado de São Paulo. As análises foram conduzidas no Laboratório Agroflorestral de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN) pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), sendo esta biomassa uma fonte alternativa de energia com alto teor energético e baixa umidade

Palavras-chave: poder calorífico superior, biomassa, fontes alternativas de energia.

PHYSICAL, CHEMICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF SUGARCANE BAGASSE *PELLETS*

ABSTRACT: Bioenergy is one of the alternatives to reduce the dependence on fossil fuels in the world energy matrix. Pellets appear like an attractive option for the production of biomass, and sugarcane can be used in the form of pellets. Pellets are the name given to the product that affects the process of applying a raw material, and in many cases, this material is prepared for the drying and grinding process. The objective of the research was to carry out an analysis of the properties: physical - density, granulometry, diameter and length, chemical - fixed carbon content, volatile matter and ashes, mechanics - mechanical use, and higher heating value. Samples of pellets from farms in the State of São Paulo were analyzed. Analyzes were conducted at the Agroforestry Laboratory of Biomass and Bioenergy (LABB / IPBEN) belonging to the Faculty of Agronomic Sciences (FCA / UNESP), and this biomass showed to be an alternative source of energy with high energy content and low moisture.

Keywords: higher heating value, biomass, alternative energy source.

1 INTRODUÇÃO

Uma das fontes de energia renováveis e com grande potencial de desenvolvimento para os próximos anos é a biomassa. Esta é considerada uma das principais alternativas para substituir fontes de energia como o petróleo e o carvão mineral e, consequentemente minimizar a dependência de combustíveis fósseis. A utilização racional da biomassa é de grande importância ambiental para reduzir a emissão de gases provenientes do efeito estufa e o consumo de outros combustíveis. A biomassa é proveniente de uma fonte de energia solar que inicialmente é armazenada pelas plantas durante o processo de fotossíntese, onde o dióxido de carbono é captado e convertido em matéria, principalmente sob a forma de celulose, hemiceluloses e lignina (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016). O potencial de utilização da biomassa como combustível inclui: madeira, culturas energéticas, resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, resíduos de processos alimentícios, plantas aquáticas e algas, resíduos de animais e uma série de outros materiais (DEMIRBAS, 2004).

A evolução do consumo mundial de energia baseada em combustíveis fósseis conduziu a humanidade para uma matriz energética insegura, cara e, sobretudo, bastante negativa para o meio ambiente (BRITO, 2007). Por conta da crescente demanda por fontes renováveis de energia, estudos sobre a geração de energia a partir da biomassa agrícola têm sido realizados no Brasil e no mundo, resgatando o potencial da biomassa, inclusive do bagaço de cana, para geração de energia limpa (MOREIRA, 2011).

A utilização de resíduos como bagaço de cana, funciona como uma alternativa energética aos combustíveis sólidos convencionais (lenha e carvão). No Brasil, dentre as matérias primas de biomassa mais utilizadas têm-se o bagaço de cana-de-açúcar, que é o resíduo final da retirada do caldo da cana-de-açúcar nas usinas que produzem álcool e açúcar, posicionando o país entre os maiores produtores do mundo (MAPA, 2016). Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e

Abastecimento, em 2016 a produção nacional de cana-de-açúcar foi de 691 milhões de toneladas, sendo 3,8% a mais que no ano de 2015 (MAPA, 2016). Segundo Silva, Gomes e Alsina (2007), 27% dessa massa representa a quantidade de resíduo de bagaço de cana-de-açúcar após o processo de produção das usinas de açúcar e álcool.

Os dados do EPE (2016) indicam que a produção de bagaço de cana-de-açúcar foi de 154,1 milhões de toneladas. O bagaço de cana-de-açúcar vem sendo aproveitado no Brasil em grande escala. Em 2016, 17,5% da energia consumida pelo país veio da utilização do bagaço de cana-de-açúcar (EPE, 2016). O bagaço de cana-de-açúcar também pode ser aproveitado na forma de *pellets*, que é uma das formas de adensamento da biomassa, assim como os briquetes, que pode reduzir os custos de transporte e armazenamento (Eufrade-Júnior et al., 2017). Dentre as principais características dos *pellets* em relação a sua matéria prima destaca-se o maior poder calorífico superior, maior densidade, menor umidade e variação higroscópica, fácil manuseio e armazenamento, o que torna o produto final muito vantajoso se comparado à matéria prima inicial (RABIER et al., 2014; TEMMERMAN et al., 2006 e THEERARATTANANOON et al., 2011).

Diante do exposto, o objetivo do trabalho é estudar as principais características do processo de fabricação e do produto final resultante da peletização do bagaço de cana-de-açúcar por meio das análises físicas, químicas e mecânicas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material e amostragem

A matéria-prima foi proveniente de fazendas produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo. O experimento e as análises foram conduzidos, no Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN), pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), campus de Botucatu – SP. O local está situado na longitude 48° 26' W e latitude 22° 51' S a 786 m acima no nível do mar.

2.2 Método

Todas as análises foram feitas com base em normas europeias ou americanas.

2.3 Determinação das propriedades físicas

A determinação da densidade aparente (a granel) foi realizada a partir da adaptação da norma NBR 6922, onde se utilizou um cilindro de volume conhecido de 2,0 litros, o qual foi preenchido até a borda com os *pellets*, e com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1 g obteve-se a massa, com variação admitida entre as repetições de 2%. Nesse caso, a densidade também foi obtida através da razão entre a massa e o volume.

Sendo utilizada a Equação (1):

$$X = \frac{10w(100-y)}{hA} \quad (1)$$

Em que:

X = densidade aparente (quilogramas de cavacos base seca por metro cúbico);

w = massa da amostra (gramas);

y = teor de umidade (porcentagem);

h = altura média dos cavacos no tubo (centímetros);

a = área da seção transversal do tubo (centímetros quadrados).

Para determinação do teor de umidade (U%) utilizou-se a norma ASTM E871-82/2006, onde foi determinado com base úmida para o material fresco, sendo utilizada a Equação (2):

$$U = \frac{mu-ms}{mu} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

U = teor de umidade na base úmida (%);

mu = massa úmida da fração coletada (g);

ms = massa seca da fração após secagem na estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (g);

O diâmetro dos *pellets* é imposto pela ferramenta da matriz de peletização, tendo em vista a expansão sofrida após este processo ou mesmo pelo desgaste da ferramenta, as variações de diâmetros dos *pellets* podem

ocorrer. Por esse motivo foram efetuadas 50 medições do diâmetro e do comprimento do pellet utilizando um paquímetro.

2.4 Determinação das propriedades químicas

Para a realização da análise química imediata do material foi adotada a norma ABNT NBR 8112/86. Os *pellets* foram moídos em moinho tipo Willey e, classificados em três granulometrias após passagem pela peneira vibratória: partículas que ficaram retidas na peneira de 40 mesh (> 40 mesh), partículas que passaram na peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh (40-60 mesh), e por último as partículas que passaram da peneira de 60 mesh (< 60 mesh). Para as análises físico-química foi utilizada a fração de 40-60 mesh, exceto para a análise de poder calorífico superior que foi selecionada a fração de 60 mesh.

A análise imediata consiste na determinação do teor de material volátil (queimado no estado gasoso), carbono fixo (queimado no estado sólido) e cinzas (componente residual após combustão).

Para determinação dos componentes utilizou-se as normas - carbono fixo (CF) ASTM E870-82/2006, material volátil (MV) ASTM E872-82/2006 e cinzas (CZ) ASTM D1102-84/2007, foi utilizado um forno mufla $^\circ\text{C}$. As amostras foram secadas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtenção do material seco. Para os ensaios de CZ foi utilizado duas gramas e MV foi utilizado um grama de material na fração 40-60 mesh, e o CF foi obtido por diferença. A amostra foi colocada em cadinho de porcelana com a tara conhecida, o mesmo foi utilizado com tampa para o ensaio de material volátil e sem tampa para cinzas. A pesagem foi realizada com balança de precisão após as amostras serem armazenadas no dessecador com sílica gel para resfriamento sem ganho de umidade.

O teor de matérias voláteis (MV) foi obtido após a amostra permanecer na mufla a $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ por sete minutos. A mufla utilizada no ensaio foi diferente da proposta pela norma americana; desta forma, para contornar a situação, o tempo foi cronometrado

somente quando a mufla atingiu a temperatura próxima a 900 °C.

O teor de cinzas (CZ) foi obtido após manter a amostra na mufla a 600 °C ± 20 °C após três horas. Para a determinação dos componentes MV e CZ, foi utilizada a Equação (3):

$$Y = \frac{(mi-mf)}{mi} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

Y = teor do componente avaliado (%)

Mi = massa inicial da amostra (g);

Mf = massa final após condicionamento específico (temperatura e tempo) na mufla (g).

O teor de carbono fixo foi obtido indiretamente, com uso da Equação (4):

$$CF = 100 - (MV-CZ) \quad (4)$$

Em que:

CF = teor de carbono fixo (%);

MV = teor de material volátil;

CZ = teor de cinzas.

2.5 Determinação das propriedades mecânicas

A durabilidade é uma característica fundamental dos *pellets*, e depende principalmente da taxa de compressão definida entre a razão diâmetro e comprimento do furo da matriz de peletização e da temperatura alcançada durante o processo (LARSON et al., 2007).

Neste trabalho o teste de durabilidade foi realizado de acordo com a norma EN 15210-1/2005 que consiste em colocar 500g do produto dentro de uma caixa com dimensões de 300 mm x 300 mm x 125 mm em uma rotação de 50 rpm, completando 500 rotações. Posteriormente são separados os finos através da passagem do material por uma peneira com abertura de malha de 3,15 mm. Os testes foram replicados três vezes.

A durabilidade mecânica foi calculada dividindo-se a massa dos *pellets* peneirada depois do ensaio, separando a quantidade de finos, e dividindo pela massa total de *pellets* antes do ensaio. E a quantidade de finos foi

calculada pela razão entre a massa de finos peneirada pela massa total de *pellets* antes do ensaio. Ambos dados são apresentados em termos percentuais, conforme descrito pela Equação (5):

$$Du = 100 - (100 \frac{mr}{mi}) \quad (5)$$

Em que:

Du = Durabilidade mecânica (em % de massa);

mr = é a massa de partículas menores que 3,0 mm retidas na peneira (em gramas);

mi = é a massa inicial (em gramas).

Os ensaios foram obtidos em triplicata, e os parâmetros de análise de acordo com a referida norma são: durabilidade alta quando a medida for superior a 80%, durabilidade média quando a medida estiver entre 70 e 80% e durabilidade baixa quando a medida for inferior a 70%.

2.6 Determinação da poder calorífico superior

Para determinação do poder calorífico superior, utilizou-se a norma ASTM E711-87/2004. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Bromatologia, localizado no Departamento de Melhoramento e Nutrição animal, FMVZ / UNESP, campus de Botucatu-SP.

Para a análise do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro do modelo C2000 conectado a um termostato modelo KV 400 e uma bomba calorimétrica (ou frasco de decomposição) modelo C5010, ambos da marca IKA® WERKE. As amostras utilizadas (fração de 60 mesh) foram levadas à estufa a 105 °C ± 2 °C para obtenção do material seco. Nesse caso, foi utilizado aproximadamente 0,5 g por amostra e a pesagem realizada com balança de precisão de 0,1 mg. Após a determinação da massa seca, cada amostra foi colocada no cadinho de combustão (20 mm de diâmetro e 19,5 mm de altura). O fio de algodão (padrão) faz a ligação entre a amostra e a haste metálica de ignição. Após o preparo da amostra, a cápsula principal é fechada e há o preenchimento automático de

oxigênio dentro da bomba calorimétrica e a água (temperatura controlada) na cuba que envolve o mesmo.

Após a ignição, ocorre a combustão e o calor liberado é transferido para água. O aumento de temperatura na água é aferido por meio de sensores e o software (C5040 CalWin) do equipamento, associam a leitura em energia produzida pela unidade de massa da amostra. Nos cálculos, o equipamento desconta a influência dos outros componentes do frasco durante a combustão (ex. o fio de algodão).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinar o potencial energético da biomassa em questão, foi necessário conhecer suas características físico-químicas e mecânicas, e também seu poder calorífico superior.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos através da análise imediata e de poder calorífico superior, realizados com os *pellets*, juntamente com o desvio padrão dos valores encontrados.

Tabela 1. Composição química imediata e poder calorífico superior.

Amostra	UBU (%)	CF (%)	MV (%)
<i>Pellets</i>	7,94 ± 0,07	15,12 ± 0,75	82,72 ± 0,78
Amostra	CZ (%)	PCS (kcal kg ⁻¹)	PCS (MJ kg ⁻¹)
<i>Pellets</i>	2,15 ± 0,03	4263	17,81

Em geral o teor de umidade dos *pellets* variou entre 7,94% e 8,05%. Na literatura recomenda-se teor de umidade abaixo de 6%. O teor de carbono fixo encontrado corrobora com os valores declarados por Brito e Barrichello (1977). Os *pellets* apresentam alto teor de material volátil 82,72% a 83,50% quando comparado com a literatura. O teor de cinzas, em geral são altos pois podem vir de fontes

externas como impurezas adquiridas no transporte ou no processamento da matéria prima. O PCS dos *pellets* analisados teve valores com baixo coeficiente de variação e o valor encontrado para o PCS foi de 17,81 MJ kg⁻¹.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da caracterização física e mecânica dos *pellets*.

Tabela 2. Composição física e mecânica.

Amostra	Menor Valor	Valor Médio	Maior Valor	Desvio Padrão
Diâmetro (mm)	6,02	6,578	7,01	0,21
Comprimento (mm)	7,00	13,6	21,0	0,24
Densidade (kg m ⁻³)	548,10	569,04	589,99	29,62
Durabilidade mecânica (%)	87,24	91,23	95,22	5,63

Os diâmetros finais não tiveram variação significativa porque são todos produzidos numa matriz perfurada com diâmetro de 6,0 mm. No entanto, o comprimento mínimo encontrado 7,0 mm e o máximo de 21,0 mm permitiram verificar que

há grandes variações no processo de fabricação dos mesmos. A granulometria dos *pellets* avaliados foram bastante uniformes durante o ensaio de classificação, sendo que para as classes >100 mm, 100 a 63 mm, 63 a 45 mm e 45 a 16 mm não foram retidos material (Tabela 3).

Tabela 3. Granulometria das amostras.

Amostras	Granulometria (%)		
	16 a 3,35 mm	3,35 a 1,2 mm	<1,2 mm
<i>Pellets</i>	91,2	0,4	1,1

Além disso os resultados foram comparados com as principais normas de qualidade para a comercialização de *pellets* de biomassa. Em geral o estudo mostrou que para alguns parâmetros, existem diferenças entre os resultados encontrados neste experimento e os resultados relatados em outros trabalhos científicos. O bagaço de cana-de-açúcar proveniente de diferentes regiões, como o Brasil, Cuba e Colômbia, processados em diferentes países, tem apresentado resultados diversos. Isso indica que as propriedades dos *pellets* podem variar dependendo da origem da matéria-prima, do processo de produção e, certamente, depende do procedimento de avaliação utilizado para determinar as suas propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Os resultados indicam que o material possui facilidade na ignição devido ao alto teor de materiais voláteis, embora o teor de cinzas encontrado sugere uma alta presença de

resíduos após a queima, o que faz com que os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar apareçam como fonte energética tanto para fins industriais como domésticos.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados em relação ao teor de umidade, durabilidade mecânica e poder calorífico superior, os *pellets* podem ser considerados como biocombustíveis renováveis tanto para fins industriais como domésticos e apresentaram um alto potencial energético.

5 AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Grupo Hengel e ao IPBEN (Instituto de Pesquisas em Bioenergia).

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **D1102**: Standard Test Method for ash in wood. Philadelphia: ASTM, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **E870**: Standard Test Method for analysis of fuels. Philadelphia: ASTM, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **E871**: Standard Test Method for moisture analysis of particulate wood fuels. Philadelphia: ASTM, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **E872**: Standard Test Method Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. Philadelphia: ASTM, 2006.

ARSHADI, M.; GREF, R.; GELADI, P.; DAHLQVIST, S.; LESTANDER, T.; The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and *pellet* quality. **Fuel Process Technol.** Sweden, v. 89,1, p. 1442-1449, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14984**: Madeira – Determinação da densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Carvão vegetal – Ensaio físicos – Determinação da massa específica – Densidade a granel. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro: ABNT 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão Vegetal – Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, n. 24, p. 9-20, 1977.

DEMIRBAS, A. Fuels from biomass. *In*: DEMIRBAS, A. (ed.). **Biorefineries: for Biomass Upgrading Facilities**. London: Springer, 2010. chap. 2, p. 33-73.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Konya, v. 30,1, p. 219-230, 2004.

EUFRADE-JÚNIOR, J. E.; NAKASHIMA, T. G.; YAMAGI, F. M.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. **Industrial Crops and Products**, Netherlands, v. 108, p. 636-640, 2017.

EUROPEAN STANDARDS. **EN ISO 15210-1**: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of *pellets* and briquettes - Part 1: *pellets*. Bruxelas: European Standards, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2016**: resultados preliminares - ano base 2013. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. 288 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global tracking framework: progress toward sustainable energy**. Washington, D.C., 208 p., 2017.

LARSON, S. H.; THYREL, M.; GELADI, P.; LESTANDER, T. A. High quality biofuel pellet production from precompacted low density raw materials. Swedish University of Agricultural Sciences Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences. **Bioresource Technology**, Umea, v. 99, n. 5, p. 7176-7182, 2007.

MOREIRA, J. M. M. A. P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-372, 2011.

RABIER, F.; TEMMERMAN, M. I.; BOHM, T.; HARTMANN, H.; Particle density determination of *pellets* and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, Gembloux, v. 30, 2, p. 954-963, 2006.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S. Utilização do bagaço de cana como adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina grande, v.2, 1, p. 27-32, 2007.

TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P. D.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 30: p. 964-972, 2006.

THEERARATTANANOON, K.; XU, F.; WILSON, J.; BALLARD, R.; MCKINNEY, L.; STAGGENBORG, S.; VADLANI, P.; PEI, Z.J.; WANG, D. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. **Industrial crops and products**, Manhattan, v.33, 3, p. 325-332, 2011.